

## Секция 2 – Функциональные материалы

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МО-СИ,  
ПОЛУЧЕННЫХ В СИСТЕМЕ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ***Ю.Н.ВЫМПИНА (ПОЛОВИНКИНА), Ю.Л. ШАНЕНКОВА*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: [xyulyashax@mail.ru](mailto:xyulyashax@mail.ru)

Металлические композиционные материалы на основе молибдена и меди обладают такими уникальными свойствами, как высокая теплопроводность и низкое тепловое расширение, механическая прочность, что обуславливает их возможность применения в качестве электродов, корпусов интегральных схем, СВЧ-приборах высокой мощности и т.д. [1-2]. Также молибден является более предпочтительным вольфраму ввиду своей малой плотности. Однако молибден и медь имеют очень малую растворимость в твёрдом состоянии при температуре плавления меди. Это приводит к некоторым трудностям по созданию плотного композиционного материала на основе данных компонентов.

Композиты системы Мо-Си обычно получают путём инфильтрации жидкого металла. Предварительно порошок молибдена спекают, тем самым получая пористую заготовку, затем проводят инфильтрацию расплавленной меди [3]. Однако данный способ имеет множество недостатков, таких как низкая скорость уплотнения, большая длительность процесса. В данной работе представлены результаты по получению композиционных материалов на основе порошков меди и молибдена искровым плазменным методом, а также исследования механических свойств полученных композитов. Данный метод является безопасным, одностадийным, имеет малую продолжительность по времени, что снижает вероятность образования агломератов в конечных продуктах. Также позволяет сохранять мелкозернистую структуру у получаемого материала, что положительно сказывается на механических свойствах изготавливаемого материала.

В работе использовалось 2 вида порошка: порошок молибдена – коммерческий, производства Aladdin Industrial Corporation (Китай), порошок меди получен плазмодинамическим методом, в системе коаксиального магнитоплазменного ускорителя с медными электродами [4]. Порошки молибдена и меди использовались в соотношении 70 к 30; смесь готовилась в мельнице Mixer/Mill 8000M в форме из нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в течение 30 минут без шариков. Далее производили компактирование полученной смеси в установке искрового плазменного спекания при следующих параметрах:  $P = 60$  МПа,  $t = 10$  минут, окружающая среда – вакуум, температура – от  $1000^\circ\text{C}$  до  $1060^\circ\text{C}$ , с шагом  $20^\circ\text{C}$ .

Микроструктура полученных образцов исследована методом сканирующей электронной микроскопии с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM-3000. Выявлено, что диапазон размера зёрен составляет  $3\div 35$  мкм и зависит главным образом от размера частиц исходных порошков. С повышением температуры спекания уменьшается количество пор, тем самым обеспечивается высокая плотность материала. К тому же, в образцах, полученных при температурах  $1040\div 1060^\circ\text{C}$ , частицы имеют минимальный размер, что также обеспечивает их более плотное прилегание друг к другу. Плотная структура образцов должна положительным образом сказаться на их механических свойствах.

Твердость объёмных образцов определяли с помощью тестера твердости Galileo Durometer Isoscan HV2 OD с нагрузкой образца 0,5 кгс. Измерение твердости проводили по методу Виккерса. Сущность метода заключается во вдавлении в испытуемый материал правильной четырёхгранной алмазной пирамиды с углом  $136^\circ$  между противоположными гранями. Результаты измерений представлены на рисунке 1. Видно, что твёрдость образцов растёт с увеличением температуры, т.к. высокая температура способствует более быстрому уплотнению материала. Наибольшее значение твёрдости было получено для образца, спекённого при  $t = 1060^\circ\text{C}$  и равно  $260,2$  HV, что значительно выше твёрдости чистого молибдена, равной около  $157$  HV.

Трибологические характеристики композитов оценивались в условиях возвратно-поступательного скольжения. Испытания проводились с частотой колебаний 2 Гц с радиусом кривизны 2 мм. В качестве индентора использовался шарик карбида вольфрама WC диаметром 10 мм, его скорость составляла 2,5 см/с при 5000 оборотах. Нормальная нагрузка была равной 3 Н. Трибологические испытания проводились при комнатной температуре в воздухе с относительной влажностью 50%. Время проведения эксперимента составляло в среднем 40 минут. На протяжении всего теста регистрировался коэффициент трения. Результаты измерений представлены на рисунке 2. Стоит отметить, что с повышением температуры спекания коэффициент трения падает ввиду более плотной структуры спекаемых таблеток при высоких температурах. Максимальный коэффициент трения был выявлен у образца, полученного при  $t = 1060$  °C, и равен 0,48 о.е. Наихудший результат достигается при минимальной температуре спекания, т.е. при 1000 °C ввиду недостаточно высокой температуры спекания.

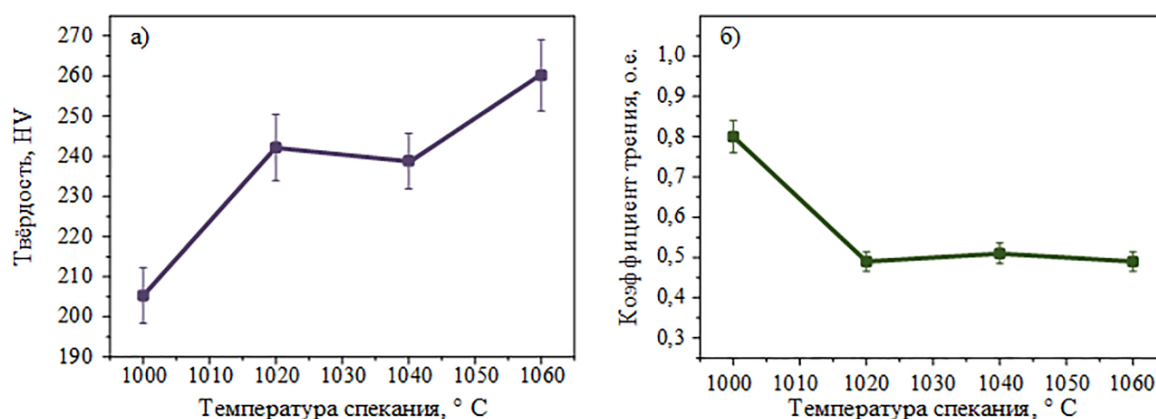


Рисунок 1 – Графики зависимостей твёрдости (а) и коэффициента трения (б) от температуры спекания

В конце стоит отметить, что в работе представлены результаты по созданию металлических композиционных материалов на основе порошков молибдена и меди искровым плазменным методом. Микроструктура образцов формируется мелкозернистой, с малым количеством пор. Выявлено, что наиболее оптимальной температурой спекания является 1060 °C. Образец, полученный при данной температуре, имеет лучшие показатели по твёрдости и коэффициенту трения.

#### Список литературы

1. Aguilar C., Guzman D., Rojas P.A., Ordoñez Stella, Rios R. Simple thermodynamic model of the extension of solid solution of Cu–Mo alloys processed by mechanical alloying // *Materials Chemistry and Physics*. – 2011. – Vol. 128. – P. 539–542.
2. Kumar A., Jayasankar K., Debata M., Mandal A. Mechanical alloying and properties of immiscible Cu-20 wt.% Mo alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2015. – Vol. 647. – P. 1040-1047.
3. Johnson J.L., German R. M. Role of Solid-State Skeletal Sintering during Processing of Mo-Cu Composites // *Metallurgical and Material Transactions A*. – 2001. – Vol. 32. – P. 605-613.
4. Половинкина Ю. Н., Шаненкова Ю. Л., Сайгаш А.С. Нанесение медного покрытия на алюминиевые поверхности с высокой прочностью сцепления // *Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. – Томск, 2016. – Т. 1: Физика. – С. 229–231.